

GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N型最后一个量子势垒对发光二极管内量子效率的影响

时强 李路平 张勇辉 张紫辉 毕文刚

Identifying the influence of GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N type last quantum barrier on internal quantum efficiency for III-nitride based light-emitting diode

Shi Qiang Li Lu-Ping Zhang Yong-Hui Zhang Zi-Hui Bi Wen-Gang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 158501 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.158501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.158501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I15>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

刻蚀 AlN 缓冲层对硅衬底 N 极性 n-GaN 表面粗化的影响

Influence of etching AlN buffer layer on the surface roughening of N-polar n-GaN grown on Si substrate

物理学报.2016, 65(8): 088501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.088501>

TiO<sub>2</sub> 微粒对远程荧光粉膜及白光发光二极管器件光色性能的影响

Investigation of photo-chromic properties of remote phosphor film and white light emitting diode mixed with TiO<sub>2</sub> particles

物理学报.2016, 65(5): 058501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.058501>

利用单层密排的纳米球提高发光二极管的出光效率

Light-extraction enhancement of GaN-based LEDs by closely-packed nanospheres monolayer

物理学报.2015, 64(14): 148502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.148502>

利用温变电容特性测量发光二极管结温的研究

Junction temperature measurement of light-emitting diodes using temperature-dependent capacitance

物理学报.2015, 64(11): 118501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.118501>

光致电化学法提高垂直结构发光二极管出光效率的研究

Increase in light extraction efficiency of vertical light emitting diodes by a photo-electro-chemical etching method

物理学报.2015, 64(1): 018501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.018501>

# GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N型最后一个量子势垒对发光二极管内量子效率的影响\*

时强<sup>1)2)</sup> 李路平<sup>1)2)</sup> 张勇辉<sup>1)2)†</sup> 张紫辉<sup>1)2)</sup> 毕文刚<sup>1)2)‡</sup>

1)(河北工业大学电子信息工程学院, 天津 300401)

2)(天津市电子材料与器件重点实验室, 天津 300401)

(2017年4月4日收到; 2017年5月23日收到修改稿)

GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N型最后一个量子势垒结构能有效提高发光二极管(LED)器件内量子效率, 缓解LED效率随输入电流增大而衰减的问题. 本文综述了该结构及其结构变化——In组分梯度递增以及渐变、GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N界面极化率改变等对改善LED器件性能的影响及优势, 归纳总结了不同结构的GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N型最后一个量子垒的工作机理, 阐明极化反转是该结构提高LED性能的根本原因. 在综述该结构发展的基础之上, 通过APSYS仿真计算, 进一步探索和深入分析了该结构中In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N层的In组分及其厚度变化对LED内量子效率的影响. 结果表明: In组分的增加有助于在GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N界面产生更多的极化负电荷, 增加GaN以及电子阻挡层处导带势垒高度, 减少电子泄漏, 从而提高LED的内量子效率; 但GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N型最后一个量子势垒中In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N及GaN层厚度的变化由于会同时引起势垒高度和隧穿效应的改变, 因而In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N和GaN层的厚度存在一个最佳比值以实现最大化的减小漏电子, 提高内量子效率.

**关键词:** 氮化镓, 发光二极管, InGaN/GaN多量子阱, 内量子效率

**PACS:** 85.60.Jb, 68.65.Fg, 71.55.Eq, 02.60.Cb

**DOI:** 10.7498/aps.66.158501

## 1 引言

近几年, 发光二极管(LED)的研究和应用发展非常迅猛, 它不仅在照明领域有巨大革新, 渐渐取代白炽灯、节能灯<sup>[1-3]</sup>, 而且还可应用于LED电视背光、紫外杀菌等人们生活的许多方面<sup>[4,5]</sup>. 虽然LED的发展史已经有三十多年, 但目前仍然存在随着输入电流的增大, 器件的内量子效率(internal quantum efficiency, IQE)衰减(efficiency droop)的问题<sup>[6]</sup>. 引起IQE衰减的原因包括俄歇复合<sup>[7]</sup>、低空穴注入效率<sup>[8]</sup>、漏电子效应<sup>[9]</sup>等. 为了缓解俄歇

复合, 可以利用量子阱内能带平坦化从而减少局域载流子浓度来改善LED的发光效率<sup>[10]</sup>. 对于低效的空穴注入, 研究人员采取了许多不同的结构设计对其进行改善. 例如在p-GaN层与金属电极之间插入一层1 nm厚的SiO<sub>2</sub>绝缘层, 从而在LED器件内构成一个电荷反转器(charge inverter)<sup>[11]</sup>; 在p-GaN层中间插入一层p型的AlGaN薄层, 形成电子阻挡层(electron blocking layer, EBL)/p-GaN/p-AlGaN异质结, 构成空穴加速器结构(hole accelerator)<sup>[12]</sup>. 以上两种新结构皆可以有效地提高p-GaN区的空穴注入到量子阱中. 与此同时, 由于电子比空穴活跃, 因此很容易逃离量子阱有源

\* 国家重点研发计划(批准号: 2016YFB0400800, 2016YFB0400801)、国家自然科学基金(批准号: 61604051, 51502074)、天津市自然科学基金(批准号: 16JCQNJC01000, 16JCYBJC16200)和人社部留学人员科技活动项目择优资助项目(批准号: CG2016008001)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangyh@hebut.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: wbi@hebut.edu.cn

区,造成漏电子效应,对此研究者提出利用p型AlGaN的EBL来阻挡电子的逃逸<sup>[13]</sup>,但是沿[0001]晶向生长的GaN型量子垒与AlGaN型EBL之间存在晶格失配,导致严重的极化效应,引起量子垒与EBL界面处的电子积累效应,从而降低了EBL处的导带势垒高度,导致电子的逸出.所以随着LED的发展,此结构对于电子的限制作用已经不能满足人们对高效LED器件的需求,于是研究者采用N极性面的极化反转型EBL结构来改善电子逃逸<sup>[14]</sup>.但是此方法若要应用到实际中,需要用到激光剥离、晶片键合技术来去除衬底等复杂的工艺,实验难度以及成本非常大.除了关注EBL,LED中量子垒的结构在影响电子注入效率方面也至关重要<sup>[15]</sup>,其中一个减小电子逃逸概率的方法是采用GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N型作为最后一个量子势垒<sup>[16-22]</sup>.此方法具有结构简单、制作成本低、可控性强等一系列的优势,因此本文回顾了GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N型最后一个量子势垒结构的发展及其在改善电子注入效率方面的特点和作用,同时进一步研究了该结构中In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N的厚度和In组分对LED器件电子注入效率及IQE的影响.

## 2 GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N作为最后一个量子垒的研究概况

在2011年,Kuo等<sup>[16]</sup>首次提出利用GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N结构来替换传统的GaN最后一个量子垒.他们将传统的12 nm厚的最后一个GaN垒替换成6 nm厚的GaN和6 nm厚的In<sub>0.01</sub>Ga<sub>0.99</sub>N,从而构成GaN/In<sub>0.01</sub>Ga<sub>0.99</sub>N型量子垒,并理论仿真比较了三组器件:最后一个量子垒为12 nm GaN的传统型LED器件(Original structure)、GaN/非掺杂In<sub>0.01</sub>Ga<sub>0.99</sub>N量子垒结构的LED器件(Structure A)和GaN/p-In<sub>0.01</sub>Ga<sub>0.99</sub>N量子垒结构的LED器件(Structure B).计算结果表明,Structure A和Structure B的IQE都明显高于Original structure.三种器件的效率衰减分别为53%,52%,47%,效率衰减问题也明显得到改善.同时他们发现在100 mA输入电流下Original structure,Structure A及Structure B中p-EBL的势垒高度分别为424,444,456 meV,由此得出Structure A和Structure B电子逃逸概率均小于Original structure,证实了GaN/In<sub>0.01</sub>Ga<sub>0.99</sub>N型量子垒的EBL

对电子的限制能力优于传统器件,从而可以有效提高LED器件的IQE.与此同时,Kuo等<sup>[16]</sup>进一步对比Structure A和Structure B,发现p型掺杂的In<sub>0.01</sub>Ga<sub>0.99</sub>N层能为量子阱提供更多的空穴,所以GaN/p-In<sub>0.01</sub>Ga<sub>0.99</sub>N量子垒能进一步改善器件的性能.

随后许多研究者对GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N型最后一个量子垒结构从不同的角度进行了实验论证<sup>[17,18]</sup>.Lu等<sup>[17,18]</sup>对比研究了10 nm GaN作为最后一个量子垒结构的传统LED器件和利用10 nm GaN/10 nm p-In<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>N型作为最后一个量子垒结构的LED器件.通过实验测试发现在200 mA的输入电流下,最后一个量子垒中插入p-In<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>N层的器件光功率比传统的对比器件提高了39.7%.他们通过仿真计算发现,插入p-In<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>N层的器件的漏电子更小,且量子阱内空穴和电子浓度更高,所以IQE更高.随后他们进一步对p-In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N插入层的In组分沿[0001]生长方向进行了由0到0.06的渐变,通过仿真计算出具有渐变In组分的GaN/p-In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N型最后一个量子垒LED器件的效率衰减仅为5.3%,而固定In组分的GaN/p-In<sub>0.03</sub>Ga<sub>0.97</sub>N量子垒LED器件和传统GaN量子垒LED器件则高达9.3%和21.7%.

Lin等<sup>[19]</sup>着重讨论了GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N型最后一个量子垒结构中Mg掺杂的影响.他们对比了GaN LED(8 nm的GaN作为最后一个量子垒),InGaN LED(3 nm GaN/5 nm In<sub>0.07</sub>Ga<sub>0.93</sub>N作为最后一个量子垒)和p-InGaN LED(3 nm GaN/5 nm p-In<sub>0.07</sub>Ga<sub>0.93</sub>N作为最后一个量子垒)三个不同垒的LED器件.其三个器件的外量子效率EQE和光功率随电流的变化如图1所示.可以看到随着输入电流增大,InGaN LED和p-InGaN LED皆比GaN LED的输出功率大,且p-InGaN LED的输出功率在1 A注入电流下是GaN LED的1.35倍.EQE提升显著,其中p-InGaN LED的效率衰减仅为7%,且效率衰减的起始电流较高,但是在低驱动电流(小于200 mA)下,p-InGaN LED的EQE却最低.为了揭示这异常现象,他们利用次级离子质谱(SIMS)对GaN LED和p-InGaN LED中各个元素的空间分布进行表征分析(如图2所示),发现p-InGaN LED中Mg原子扩散至量子阱有源区中,从而导致量子阱区的晶格质量降低,同时在量子阱

中产生非辐射复合中心<sup>[23]</sup>,所以在注入电流比较低时,载流子的复合以Shockley-Read-Hall复合为主,故EQE降低,且效率衰减的起始电流高于GaN LED和InGaN LED<sup>[24]</sup>.但随着输入电流的增大,器件的主要复合方式变为辐射复合,所以LED器件的EQE增加且衰减显著缓解.由此可以得出,尽管GaN/p-In<sub>0.07</sub>Ga<sub>0.93</sub>N结构能起到很好的效果,但是在实验中由于Mg掺杂的In<sub>0.07</sub>Ga<sub>0.93</sub>N层会造成Mg原子向量子阱扩散,因此需要更加精细的工艺控制.

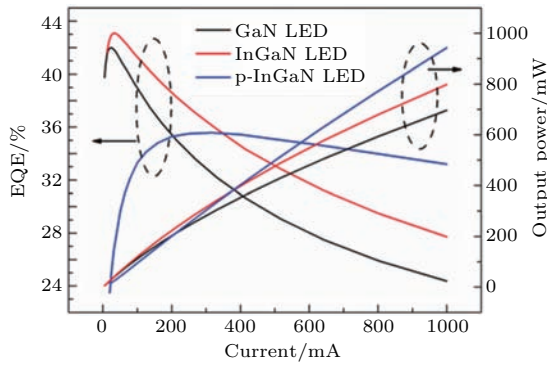


图1 (网刊彩色)不同注入电流下GaN LED, InGaN LED和p-InGaN LED的EQE和光功率<sup>[19]</sup>  
Fig. 1. (color online) EQE and output power of the GaN, InGaN, and p-InGaN LEDs plotted with respect to the forward current<sup>[19]</sup>.

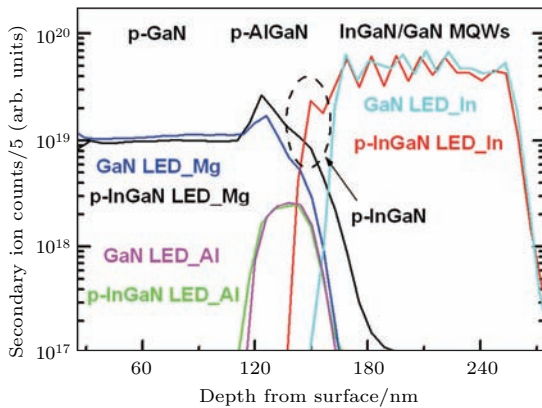


图2 (网刊彩色)SIMS表征GaN LED和p-InGaIn LED中各个元素的分布情况<sup>[19]</sup>  
Fig. 2. (color online) SIMS depth profiles of the GaN and the p-InGaIn LEDs<sup>[19]</sup>.

此外, Liu等<sup>[20]</sup>则是将LED器件中传统的30 nm AlGaIn型EBL(器件A)改变成15 nm p-InGaIn和15 nm AlGaIn组合的EBL(器件B).通过实验测量EQE,发现器件B在大电流注入下效率衰减问题得到了改善. Liu等<sup>[20]</sup>基于实验测量获得的EQE与电流关系的数据,根据Lin等<sup>[25]</sup>提出

的ABCD量子效率模型公式,利用迭代计算得到ABCD公式中相应的系数值,发现其中的器件A的系数D(代表载流子漏率)比器件B的系数D要大30倍,于是推测出采用新型InGaIn/AlGaIn EBL结构的器件B性能优于器件A的原因是减小了漏电子,从而增加了注入到量子阱中的载流子导致的.仿真计算证实了器件B的新结构有助于提高EBL处的导带势垒高度,减小电子从量子阱有源区中的逃逸概率,改善LED器件的IQE.虽然其描述方式是旨在改良EBL结构,但事实上也是构成了GaIn/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N型最后一个量子垒结构.

在2014年, Kyaw等<sup>[21]</sup>将插入的In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N中的In组分进行了阶梯递增,他们认为阶梯递增In组分变化的In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N层之间会产生更多的极化负电荷,从而产生更强的极化效应,将导致EBL处导带势垒升高.因此Kyaw等<sup>[21]</sup>在保证LED器件最后一层量子势垒总厚度一致的前提下,沿着[0001]晶体生长方向,将其中的In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N层有序地分成3 nm In<sub>0.015</sub>Ga<sub>0.985</sub>N, 3 nm In<sub>0.052</sub>Ga<sub>0.948</sub>N, 3 nm In<sub>0.09</sub>Ga<sub>0.91</sub>N.实验测试表明,具备GaIn/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N结构的最后一个量子垒LED器件电致发光强度大于传统GaIn做最后一个量子垒的器件,且在150 mA输入电流下, In组分梯度变化的GaIn/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N最后一个量子垒结构比传统器件的EQE提高了11.98%.仿真结果表明, GaIn/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N型最后一个量子垒结构器件能有效地增加最后一个量子垒对电子的阻挡作用,同时提高了EBL处导带势垒高度,降低了电子逃逸概率,从而使得LED器件有更好的光电特性.

随后Zhang等<sup>[22]</sup>进一步阐明GaIn/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N型量子垒使EBL处导带势垒增高的根本原因是极化反转.传统LED结构中GaIn型最后一个量子垒和p-AlGaIn型EBL界面处由于晶格失配,在GaIn/p-EBL界面处引起极化效应产生正电荷,导致电子积聚(electron accumulation)在GaIn/AlGaIn界面,使得界面处的局域电子浓度增大,从而n<sub>LB</sub>/EBL(最后一个垒与EBL界面处积累局域电子的浓度)增大,则EBL处导带势垒将会降低<sup>[26]</sup>.如果LED中的最后一个量子垒采用GaIn/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N结构,考虑到生长方向是沿[0001],因此在GaIn/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N界面产生了极化负电荷, GaIn处势垒上弯,导致电子耗尽(electron depletion),减少了In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/AlGaIn界面处的电

子积累,从而升高了EBL导带势垒<sup>[26]</sup>,降低了电子的逃逸概率,改善了IQE.同时Zhang等<sup>[22]</sup>进一步研究发现,由于GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N界面处的极化电荷极大地影响了GaN部分的势垒高度,所以最后一个量子垒采用GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N结构仅适用于[0001]晶向的LED结构,而对于[000 $\bar{1}$ ]晶向的LED结构,该GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N量子垒反而增加了电子的逃逸概率,减小了LED的IQE.

### 3 器件仿真及结果分析

总结所有查到的文献报道可以得知,GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N型最后一个量子垒之所以能改善LED的性能,主要是由于GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N界面出现极化负电荷,导致EBL势垒升高,漏电子减少.但我们也发现研究者在设计GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N型最后一个量子垒的基础结构器件时,都是使用固定的In组分以及In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N插入层厚度来进行实验和仿真计算.GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N型最后一个量子垒LED中In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N插入层不同的In组分和厚度对IQE的变化规律尚不清楚.为此,本文利用APSYS软件,针对GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N型结构中In组分和In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N层的厚度对LED器件性能的影响进行了系统的研究,以优化设计该结构,实现LED的IQE提升的最大化.其中俄歇系数设置为 $1 \times 10^{-42} \text{ m}^6 \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[27]</sup>,导带价带阶跃比(conduction band offset: valence band offset)设为70 : 30<sup>[28]</sup>,其中极化率设为40%<sup>[27]</sup>,即60%的极化电荷被产生的位错释放.设置Shockley-Read-Hall寿命为 $1 \times 10^{-7} \text{ s}$ <sup>[29]</sup>,关于III-V族半导体的其他相关参数可以从文献<sup>[30]</sup>得到.图3为本文所用的LED的基本结构图,沿[0001]方向分别是由4 μm厚且掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的n-GaN和3 nm In<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>N/12 nm GaN构成的7对量子阱,20 nm p-Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N构成EBL,以及0.2 μm掺杂浓度为 $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 的p-GaN.在最后一个量子垒中设置了两个参数, $x$ 代表In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N插入层中In的组分, $Y$ 代表In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N插入层的厚度,并固定GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N型最后一个量子垒的总厚度为20 nm.将In组分 $x$ 参数分别设置为0, 0.03, 0.05, 0.07. In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N层厚度 $Y$ 分别设置为1, 5, 10和15 nm.由于 $x$ 为0时,最后一个垒

即为GaN材料,因此其被定义为最后一个垒为20 nm时构成的参考LED器件,模拟器件尺寸均为 $350 \mu\text{m} \times 350 \mu\text{m}$ .

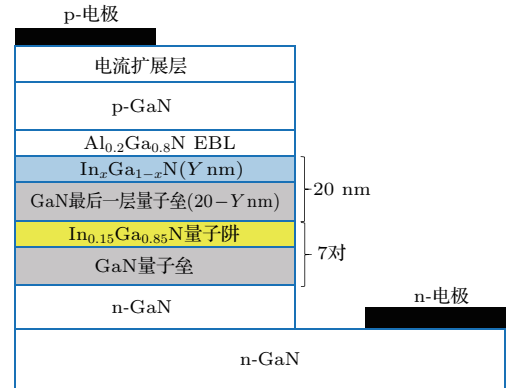


图3 (网刊彩色) 模拟LED器件结构示意图,参数 $x$ 代表GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N型最后一个量子垒中In的组分,参数 $Y$ 代表In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N层厚度,GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N型最后一个量子垒的总厚度为20 nm

Fig. 3. (color online) Schematic diagram for the LED structure. The parameter  $x$  represents the InN composition for the inserted In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N layer. The parameter  $Y$  represents the thickness for In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N layer. The total thickness of the GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N last quantum barrier is fixed to 20 nm.

IQE随着In组分和In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N厚度 $Y$ 的变化的仿真结果如图4所示.从图4可以观察到在35 mA的电流注入下,GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N型最后一个量子垒结构器件的IQE皆明显高于单纯GaN作为最后一个垒的LED器件,并且不论In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N的In组分是多少,逐渐增大In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N层的厚度对LED器件的IQE的影响并不明显,但是可以观察到厚度 $Y$ 为5 nm时LED器件的IQE相对其他厚度要高.而在同一厚度 $Y$ 下,随着In组分增大,LED器件的IQE则明显增大.为了分析IQE随着In组分和In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N厚度 $Y$ 的变化原因,器件漏电子随着In组分和插入层厚度 $Y$ 的变化如图5所示.可以发现In组分越大,器件的漏电子越小.在同一In组分下,随着In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N层厚度变化,发现在 $Y = 5 \text{ nm}$ 时器件的漏电子相对不同厚度的器件也为最低.可以明显看到图5中漏电子和图4中IQE随着厚度 $Y$ 和In组分变化的趋势正好相反,即漏电子越小,IQE越大.因此可以推测出IQE的变化主要是由于漏电子的变化所引起的,这也和前面所述的文章中报道的原因是一致的.

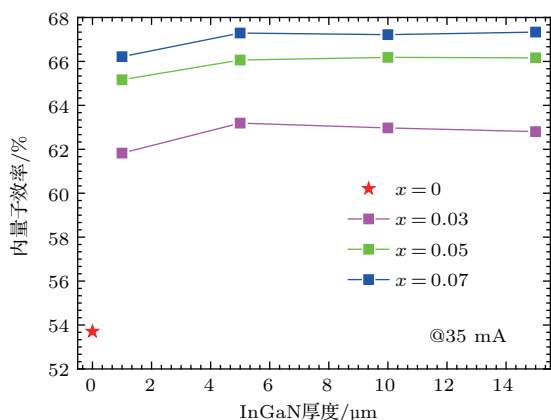


图4 (网刊彩色) 在 35 mA 输入电流下, 具有不同 In 组分的图 3 所示 LED 器件的 IQE 随着 InGaN 层厚度的变化  
Fig. 4. (color online) Under 35 mA current injection, IQE at different InGaN thicknesses for LEDs illustrated by Fig. 3 with In composition of 0, 0.03, 0.05, 0.07.

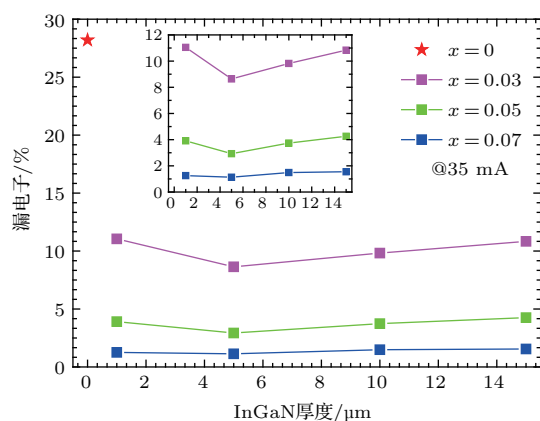


图5 (网刊彩色) 在 35 mA 输入电流下, 具有不同 In 组分的图 3 所示 LED 器件的漏电子随着 InGaN 层厚度的变化 (取值点为器件 EBL 处), 插图为  $x = 0.03, 0.05, 0.07$  时漏电子随厚度变化的放大图  
Fig. 5. (color online) Under 35 mA current injection, electron leakage at different InGaN thicknesses for LEDs illustrated by Fig. 3 with In composition of 0, 0.03, 0.05, 0.07. The Inset figure presents the curve variation in enlarged scale.

为了解释漏电子随着 In 组分增加而减小的变化原因, 厚度  $Y$  为 10 nm 但 In 组分不同时 LED 器件能带图示于图 6(a) 中. 从图 6(a) 可以观察到,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  的插入导致最后一个垒中的 GaN 的能带沿着 [0001] 生长方向上扬, 这主要是由于在 GaN/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  界面处会产生极化负电荷, 在 GaN 中产生了一个正电场 (沿 [0001] 生长方向的电

场方向为正). 另外发现 GaN 的势垒高度  $\varphi_e$  随着 In 组分的增加而升高, 这是由于 GaN/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  界面负电荷随着 In 组分的增加而增多引起的.  $\varphi_e$  越大, GaN 层对电子的阻挡和耗尽能力越强, 电子能够跃迁过 GaN 进入  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  的概率就越低, 因此  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  处的电子浓度 ( $n_{\text{LB/EBL}}$ ) 随着  $\varphi_e$  增加而减少. 另外, 随着 In 的组分增加,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlGaIn}$  处的禁带宽度差 ( $\Delta E_c$ ) 将进一步增加,  $n_{\text{LB/EBL}}$  越低且  $\Delta E_c$  越大, AlGaIn 型 EBL 的势垒将越高<sup>[26]</sup>, 即  $\varphi_A$  增加, 从而进一步阻挡了电子泄漏, 减小了漏电子. 为了验证上述理论分析的正确性, 不同  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  层厚度和 In 组分变化对  $\varphi_e$  和  $\varphi_A$  的影响示于图 7 中. 从图 7 可以看出, 和前面理论分析一致, 对于所有的  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  厚度,  $\varphi_A$  都是随着 In 组分的增加而增加.

为了解释漏电子随着  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  厚度增加而先降低后增加的变化原因, In 组分固定为 0.07, 改变器件  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  层厚度的能带图示于图 6(b) 中. 从图 6(b) 可以看出, 随着  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  层厚度的增加, 由于极化负电荷引起的势垒  $\varphi_e$  是先增加后减少的, 在厚度为 10 nm 时达到最大值, 与图 7(a) 变化相符合. 但是对比图 7(a) 和图 7(b) 可以发现  $\varphi_A$  并没有随  $\varphi_e$  的变化而变化, 而  $\varphi_A$  则是在  $Y = 5$  nm 达到最大值. 这是由于增加  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  层厚度的同时也将减小 GaN 层的厚度, 从而增加了电子从最后一个量子阱隧穿的概率, 导致  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  处积聚的电子浓度增加. 因此可以得出, 随着  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  层厚度的增加, 先是由  $\varphi_e$  增加引起  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  处积聚的电子浓度减少; 而随着  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  层厚度的进一步增加使得 GaN 厚度的减小导致隧穿效应作用明显, 从而引起  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  处积聚的电子浓度增加;  $\varphi_e$  对电子的限制作用和隧穿效应共同作用, 使得在  $Y = 5$  nm 时  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  处积聚的电子浓度 ( $n_{\text{LB/EBL}}$ ) 达到最小值. 在  $\Delta E_c$  不变的情况下, 使得 EBL 的势垒  $\varphi_A$  将随电子浓度 ( $n_{\text{LB/EBL}}$ ) 的减小而增加<sup>[26]</sup>, 因此  $\varphi_A$  在  $Y = 5$  nm 处达到最大. 所以 In 组分固定时, 随着厚度  $Y$  的增加, 漏电子是先由于  $\varphi_e$  增加导致减小, 而后又由于电子隧穿效应的加剧而增大, 并在  $Y = 5$  nm 处达到最小值.

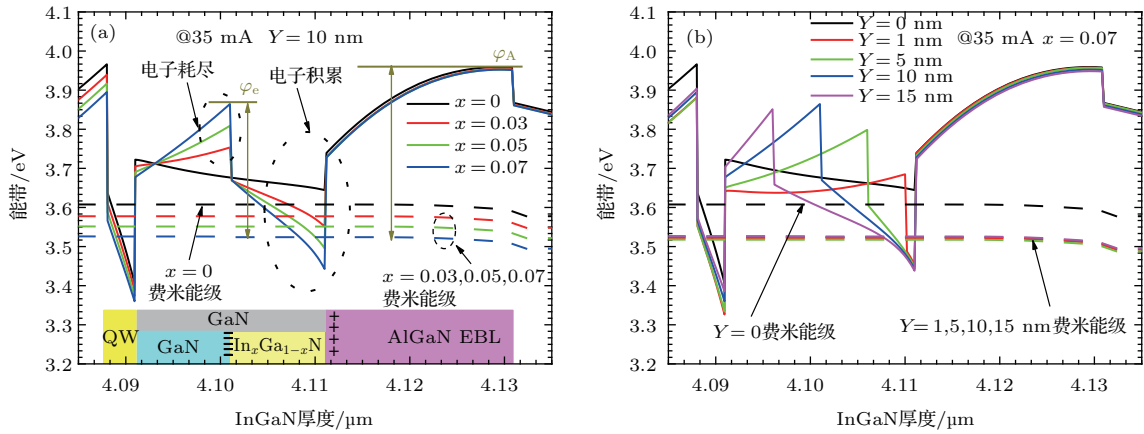


图6 (网刊彩色)(a)  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  厚度为 10 nm 时, 不同 In 组分的图 3 所示 LED 器件在最后一个量子垒附近的能带图,  $\varphi_A$ ,  $\varphi_e$  分别表示相应位置的导带势垒高度; (b) In 组分为 0.07 时, 不同  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  层厚度的图 3 所示 LED 器件在最后一个量子垒附近的能带图

Fig. 6. (color online) Calculated conduction band diagrams at 35 mA for LEDs illustrated by Fig. 3 (a) with different InN composition and a fixed  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  thickness of 10 nm, and (b) with different  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  thickness and a fixed InN composition of 0.07. Different color lumps in Fig. 6 (a) indicate the area of quantum well (QW), last quantum barrier [GaN (upper), GaN/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  (lower)], EBL, respectively (from left to right). The symbols for the polarization induced positive charges at the GaN/AlGa $\text{N}$  and InGa $\text{N}$ /AlGa $\text{N}$  interfaces as well as the polarization induced negative charges at the GaN/InGa $\text{N}$  interface are denoted as + and -, respectively.  $\varphi_A$ ,  $\varphi_e$  represent the conduction band barrier height for GaN and EBL.

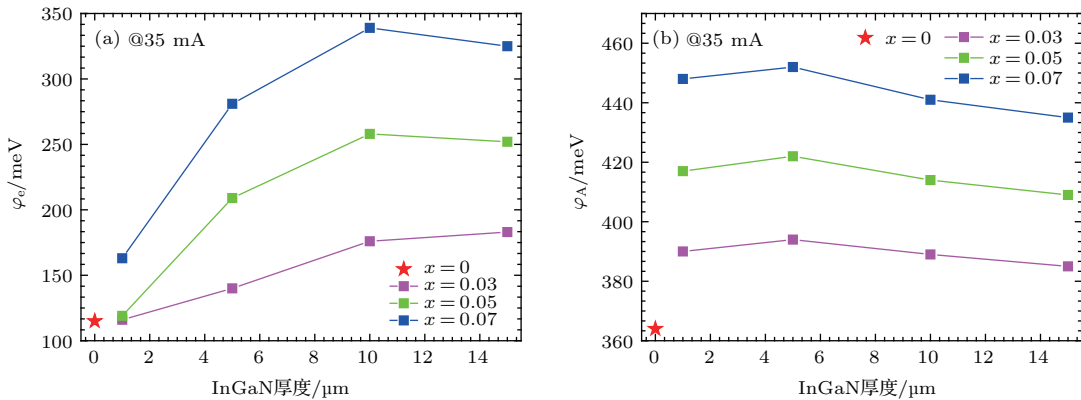


图7 (网刊彩色)(a) 在 35 mA 输入电流下, 不同 In 组分的图 3 所示 LED 器件在最后一个量子垒中 GaN 导带势垒高度 ( $\varphi_e$ ) 随着  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  厚度 Y 的变化; (b) 在 35 mA 输入电流下, 不同 In 组分的图 3 所示 LED 器件 EBL 导带势垒高度 ( $\varphi_A$ ) 随着  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  厚度 Y 的变化

Fig. 7. (color online) (a)  $\varphi_e$  and (b)  $\varphi_A$  at different InGa $\text{N}$  thicknesses for LEDs illustrated by Fig. 3 with InN composition of 0, 0.03, 0.05, 0.07, respectively, under 35 mA current injection.

## 4 结 论

GaN/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  型最后一个量子垒结构能有效地限制电子逃逸, 减小漏电子, 从而提高 LED 器件的 IQE. 本文系统地研究和分析了 GaN/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  型最后一个量子垒结构中 In 的组分和  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  厚度对改善 LED 器件性能

的影响及其机理. 发现随着 In 组分的增大, GaN/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  界面会引入更多的极化负电荷, 从而减少电子泄漏, 提高 LED 的 IQE. 而在 GaN/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  最后一个量子垒总厚度保持不变的前提下,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  和 GaN 层厚度的变化将引起势垒高度和隧穿效应的变化, 两者的共同作用下, 只有一个适当的  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  层厚度才能最大化减小漏电子, 提高 IQE.

## 参考文献

- [1] Chen W C, Tang H L, Luo P, Ma W W, Xu X D, Qian X B, Jiang D P, Wu F, Wang J Y, Xu J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 068103 (in Chinese) [陈伟超, 唐慧丽, 罗平, 麻尉蔚, 徐晓东, 钱小波, 姜大朋, 吴锋, 王静雅, 徐军 2014 物理学报 **63** 068103]
- [2] Tan S T, Sun X W, Demir H V, Denbaars S P 2012 *IEEE Photon. J.* **4** 613
- [3] Tansu N, Zhao H, Liu G, Li X H, Zhang J, Tong H, Ee Y K 2010 *IEEE Photon. J.* **2** 241
- [4] Pimputkar S, Speck J S, Denbaars S P, Nakamura S 2009 *Nat. Photon.* **3** 180
- [5] Khan A, Balakrishnan K, Katona T 2008 *Nat. Photon.* **2** 77
- [6] Verzellesi G, Saguatti D, Meneghini M, Bertazzi F, Goano M, Meneghesso G, Zanoni E 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 071101
- [7] Iveland J, Martinelli L, Peretti J, Speck J S, Weisbuch C 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 177406
- [8] Zhang Z H, Ju Z, Liu W, Tan S T, Ji Y, Kyaw Z, Zhang X, Hasanov N, Sun X W, Demir H V 2014 *Opt. Lett.* **39** 2483
- [9] Kim M H, Schubert M F, Dai Q, Kim J K, Schubert E F, Piprek J, Park Y 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 183507
- [10] Zhang Z H, Liu W, Ju Z, Tan S T, Ji Y, Kyaw Z, Zhang X, Wang L, Sun X W, Demir H V 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 033506
- [11] Zhang Z H, Zhang Y, Bi W, Geng C, Xu S, Demir H V, Sun X W 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 133502
- [12] Zhang Z H, Liu W, Tan S T, Ji Y, Wang L, Zhu B, Zhang Y, Lu S, Zhang X, Hasanov N, Sun X W, Demir H V 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 153503
- [13] Han S H, Lee D Y, Lee S J, Cho C Y, Kwon M K, Lee S P, Noh D Y, Kim D J, Kim Y C, Park S J 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 231123
- [14] Meyaard D S, Lin G B, Ma M, Cho J, Schubert E F, Han S H, Kim M H, Shim H, Kim Y S 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 201112
- [15] Cheng L, Wu S, Xia C, Chen H 2015 *J. Appl. Phys.* **118** 103103
- [16] Kuo Y K, Shih Y H, Tsai M C, Chang J Y 2011 *IEEE Photon. Tech. L.* **23** 1630
- [17] Lu T, Li S, Liu C, Zhang K, Xu Y, Tong J, Wu L, Wang H, Yang X, Yin Y, Xiao G, Zhou Y 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 141106
- [18] Lu T, Ma Z, Du C, Fang Y, Chen F, Jiang Y, Wang L, Jia H, Chen H 2014 *Appl. Phys. A* **114** 1055
- [19] Lin R M, Yu S F, Chang S J, Chiang T H, Chang S P, Chen C H 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 081120
- [20] Liu Z, Ma J, Yi X, Guo E, Wang L, Wang J, Lu N, Li J, Ferguson I, Melton A 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 261106
- [21] Kyaw Z, Zhang Z H, Liu W, Tan S T, Ju Z G, Zhang X L, Ji Y, Hasanov N, Zhu B, Lu S, Zhang Y, Teng J H, Sun X W, Demir H V 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 161113
- [22] Zhang Z H, Zhang Y, Li H, Xu S, Geng C, Bi W 2016 *IEEE Photon. J.* **8** 8200307
- [23] Kirste L, Köhler K, Maier M, Kunzer M, Maier M, Wagner J 2008 *J. Mater. Sci.-Mater. Electron.* **19** S176
- [24] Zhang Z H, Liu W, Ju Z, Tan S T, Ji Y, Kyaw Z, Zhang X, Wang L, Sun X W, Demir H V 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 243501
- [25] Lin G B, Meyaard D, Cho J, Schubert E F, Shim H, Sone C 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 161106
- [26] Zhang Z H, Liu W, Ju Z, Tan S T, Ji Y, Zhang X, Wang L, Kyaw Z, Sun X W, Demir H V 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 251108
- [27] Zhang Z H, Tan S T, Kyaw Z, Ji Y, Liu W, Ju Z, Hasanov N, Sun X W, Demir H V 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 193508
- [28] Zhang L, Ding K, Liu N X, Wei T B, Ji X L, Ma P, Yan J C, Wang J X, Zeng Y P, Li J M 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 101110
- [29] Laubsch A, Sabathil M, Bergbauer W, Strassburg M, Lugauer H, Peter M, Lutgen S, Linder N, Streubel K, Hader J, Moloney J V, Pasenow B, Koch S W 2009 *Phys. Status Solidi C* **6** S913
- [30] Vurgaftman I, Meyer J R 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 3675



# Identifying the influence of GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N type last quantum barrier on internal quantum efficiency for III-nitride based light-emitting diode\*

Shi Qiang<sup>1)2)</sup> Li Lu-Ping<sup>1)2)</sup> Zhang Yong-Hui<sup>1)2)†</sup> Zhang Zi-Hui<sup>1)2)</sup> Bi Wen-Gang<sup>1)2)‡</sup>

1) (School of Electronics and Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

2) (Key Laboratory of Electronic Materials and Devices of Tianjin, Tianjin 300401, China)

( Received 4 April 2017; revised manuscript received 23 May 2017 )

## Abstract

GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N-type last quantum barrier (LQB) proves to be useful for III-nitride based light-emitting diode (LED) in enhancing the internal quantum efficiency (IQE) and suppressing the efficiency droop level that often takes place especially when the injection current is high. In this work, GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N-type LQB reported by the scientific community to enhance the IQE is first reviewed and summarized. Then, the influences of indium composition and thickness of the In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N layer on the performance of LED incorporated with the GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N-type LQB are studied. Through analyzing energy band diagrams calculated with APSYS, we find that the [0001] oriented LQB features an electron depletion due to the polarization induced negative charges at the GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N interface. The electron depletion enhances the electron blocking effect and reduces the electron accumulation at the In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/AlGaN interface, leading to an improved IQE for the LED. In addition, increasing the indium composition of the In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N layer will generate more negative interface charges, which result in further increased conduction band barrier height for the electrons and reduced electron leakage. On the other hand, for the GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N-type LQB with a fixed indium composition, there exists an optimum thickness for the In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N layer in maximizing the improvement of IQE for the LED, mainly because the interaction between two mechanisms co-exists when varying the thickness of the In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N layer, i.e., the initial increase in the In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N layer thickness will lead to an increased conduction band barrier height, which prevents electrons from leaking into the In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N layer. However, further increasing the In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N layer thickness to a certain value, tunneling effect will kick in as a result of the simultaneously reduced GaN thickness-the electrons will tunnel through the thin GaN layer in the LQB from the quantum wells to the In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N layer. This will cause electrons to increase in the In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N layer. Therefore, as a result of the interaction between the above-mentioned two mechanisms, there is an optimum thickness for the In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N layer such that the electrons in the In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N layer will reach a minimal value, which in turn will lead to a maximized conduction band barrier height for the AlGaN electron blocking layer and facilitate the performance of LEDs.

**Keywords:** GaN, light-emitting diodes, InGaN/GaN multiple quantum wells, internal quantum efficiency

**PACS:** 85.60.Jb, 68.65.Fg, 71.55.Eq, 02.60.Cb

**DOI:** 10.7498/aps.66.158501

\* Project supported by the National Key R & D Program of China (Grant Nos. 2016YFB0400800, 2016YFB0400801), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61604051, 51502074), the Natural Science Foundation of Tianjin City, China (Grant Nos. 16JCQNJC01000, 16JCYBJC16200), and the Technology Foundation for Selected Overseas Chinese Scholar by Ministry of Human Resources and Social Security of the People's Republic of China (Grant No. CG2016008001).

† Corresponding author. E-mail: zhangyh@hebut.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: wbi@hebut.edu.cn